



Estudo da cinética e do equilíbrio de adsorção do corante azul reativo 5G pelo adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2

Equilibrium and kinetic studies of reactive blue 5G dye adsorption on Dowex™ Optipore™ SD-2 Adsorbent

Silvia Priscila Dias Monte Blanco¹

Fernando Rodolfo Espinoza-Quiñones²

Aparecido Nivaldo Módenes³

Carlos Eduardo Borba⁴

Pricila Marin⁵

Nathalia Passaia⁶

Lucas Silva Figueiredo⁷

Resumo: Neste trabalho foi avaliado o potencial de adsorção do adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 na remoção do corante Azul Reativo 5G. Os testes cinético e de equilíbrio foram realizados em sistema fechado e batelada sob agitação de 120 rpm, pH igual a 2 e temperatura de 30°C. Os resultados obtidos na cinética de adsorção apontaram um tempo de equilíbrio de 96 h. Os três modelos cinéticos ajustados aos dados experimentais (difusão no filme externo, adsorção na superfície do adsorvente e difusão nos poros do adsorvente) descreveram de forma satisfatória a cinética de adsorção do corante Azul Reativo 5G, não sendo possível determinar a etapa limitante do processo. No estudo do equilíbrio, verificou-se que o modelo de Langmuir foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, apresentando capacidade máxima de adsorção de 315 mg L⁻¹. O resultados obtidos demonstraram que o adsorvente estudado apresenta grande potencial para a remoção de corantes de efluentes têxteis.

¹ Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

² Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

³ Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

⁴ Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

⁵ Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

⁶ Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

⁷ Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Palavras-chave: Adsorção, corante têxtil, Dowex™ Optipore™ SD-2.

Abstract: In this work the Dowex™ Optipore™ SD-2 adsorbent was evaluated for removal of Reactive Blue 5G dye. Batch kinetic and equilibrium adsorption experiments were carried out using a rotary shaker (120 rpm), with pH 2 and controlled temperature (30° C). Adsorption kinetic results showed a equilibrium time at 96 hour. Three kinetic models were tested: mass transfer in the external film, adsorption on the surface and pore diffusion of the adsorbent. The three models represented well the experimental kinetic results. The equilibrium adsorption data were better represented by the Langmuir isotherm model, showing a maximum adsorption capacity of 315 mg L⁻¹. Based on these results, the Dowex™ Optipore™ SD-2 is expected to be used as a good adsorbent in treatment systems of dying effluents.

Keywords: Adsorption, textile dye, Dowex™ Optipore™ SD-2.

1. Introdução

A presença de corantes nos recursos hídricos tem gerado bastante preocupação. Estes compostos, mesmo em baixas concentrações, são tóxicos aos organismos vivos e afetam a penetração de luz solar na água, prejudicando a fotossíntese de plantas aquáticas (Hameed, 2008; Vimonses *et al.* 2009; Pajootan *et al.*, 2012). Aos seres humanos, os corantes, podem causar dermatites, câncer, entre outras doenças (Zahrim *et al.*, 2011).

Dentre as indústrias que utilizam corantes, o setor têxtil é considerado um dos maiores poluidores, uma vez que, ao longo do processo de beneficiamento do tecido, cerca de 20% do total de corantes utilizados não são fixados à fibra têxtil, sendo descartados no meio ambiente muitas vezes sem o devido tratamento (Barakat, 2011).

Os corantes reativos vêm sendo utilizados em escala crescente pelas indústrias têxteis devido à sua reatividade com as fibras e estabilidade da cor. A molécula do corante reativo pode ser definida pelos seguintes sistemas estruturais: um sistema cromofórico, responsável pelo fenômeno da cor; um grupo sulfonato, responsável pela solubilidade e caráter aniônico do corante; e um ou mais grupos reativos, que podem formar ligação covalente com as fibras de celulose por reações de adição ou substituição nucleofílica (Kimura *et al.*, 1999).

O corante Azul Reativo 5G, produzido e comercializado pela Texpal Indústria Química, apresenta excelente comportamento tintório e boa penetração, sendo amplamente utilizado em processos de lavanderia industrial e tingimento têxtil (Texpal, 2005). Pertence à linha de corantes reativos bifuncionais, composta de um sistema de cromóforos do tipo azo ligados a dois sistemas reativos: um grupamento vinilsulfona e outro grupamento monoclorotriazina (Koprivanac *et al.*, 2005).

A remoção da cor dos efluentes têxteis é um dos grandes problemas ambientais apresentado por esse setor, uma vez que os corantes são resistentes à digestão aeróbia e altamente estável ao calor, luz e agentes oxidantes (Kyzas *et al.*, 2012). Na literatura, existem diversas técnicas para o tratamento de efluentes contendo corantes, dentre elas citam-se a eletrocoagulação, a floculação, processos oxidativos avançados e a adsorção (Palácio *et al.*, 2009; Manenti *et al.*, 2010; Fiorentin *et al.*, 2010).

A adsorção é um método promissor por ser uma técnica de baixo custo, projeto simples e de fácil operação. Para tanto, é necessário que o material adsorvente apresente elevada resistência térmica e física, além de afinidade com o adsorvato. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo o estudo da cinética e do equilíbrio da adsorção do corante Azul Reativo 5G pelo adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2.

2. Materiais e métodos

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Controle de Poluição (CP) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste – Campus de Toledo.

2.1 Adsorvente

Neste trabalho foi utilizado o adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2, fabricado por Dow® Chemical Company e cedido pela empresa Coremal Comércio e Representações Maia Ltda, da cidade de Cotia – SP. As especificações do adsorvente estão expostas na Tabela 1. Antes da sua utilização nos experimentos, o adsorvente foi seco em estufa (Cienlab) a 50°C até obtenção de massa constante, aproximadamente 6h.

Tabela 1 – Especificações do adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2

Matriz	Copolímero de estireno divinilbenzeno
Grupo funcional	Amina terciária
Tamanho de partículas	0,10 - 1,20 mm
Área superficial	800 m ² g ⁻¹
Diâmetro de poros	50 Å

2.2 Soluções de Corante e Procedimento Analítico

O adsorvato utilizado neste trabalho foi o corante Azul Reativo 5G produzido e doado pela empresa Texpal Indústria Química S/A, de Valinhos – SP.

As soluções de corante foram preparadas a partir da dissolução do corante Azul Reativo 5G em água destilada. Foram preparadas soluções com diferentes concentrações, variando de acordo com o teste realizado. O pH das soluções foi ajustado em 2 utilizando solução de HCl 1 M.

O comprimento de onda de maior absorção do corante foi determinado no espectrofotômetro UV-VIS (UV 1800, Shimadzu), com solução de corante com concentração de 50 mg L⁻¹ e pH igual a 2. O comprimento de onda encontrado foi de 618 nm. A curva de calibração do espectrofotômetro UV-Vis foi construída com soluções de corante com concentração na faixa de 5 - 100 mg L⁻¹ e pH igual a 2. Com o auxílio da curva de calibração foi possível calcular a concentração de corante na fase líquida.

2.3 Cinética de Adsorção

Antes da realização dos testes cinético e de equilíbrio, foram feitos testes preliminares onde verificou-se que as melhores condições para o processo de adsorção do corante Azul Reativo 5G pelo adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 são as seguintes: pH da solução igual a 2, temperatura de operação do processo igual a 30°C e velocidade de agitação igual a 120 rpm.

O estudo da cinética de adsorção foi realizado utilizando-se erlenmeyers de 125 mL, nos

quais foram colocados 5 mg de adsorvente e 50 mL da solução de corante Azul Reativo 5G com concentração inicial de 150 mg L⁻¹. O teste cinético foi realizado em duplicata, em temperatura de 30°C, pH igual 2 e agitação de 120 rpm. As amostras foram coletadas em intervalos de tempos predefinidos e a fase líquida foi separada da fase sólida sem a necessidade de filtração. As concentrações das amostras foram analisadas em espectrofotômetro UV-VIS. A quantidade de corante na fase sólida foi calculada pelo balanço de massa dado pela Equação 1.

$$q = \frac{V(C_0 - C)}{m} \quad (1)$$

Sendo q a concentração de corante na fase sólida (mg g⁻¹); V o volume de solução (mL); C_0 e C as concentrações iniciais e finais do corante em solução, respectivamente (mg L⁻¹); m a massa de adsorvente (g).

2.4 Equilíbrio de Adsorção

O estudo do equilíbrio de adsorção foi realizado utilizando-se erlenmeyers de 125 mL, nos quais foram colocados 5 mg de adsorvente e 50 mL da solução de corante Azul Reativo 5G com concentração inicial variando na faixa de 7 - 305 mg L⁻¹. O teste de equilíbrio foi realizado em duplicata, em temperatura de 30°C, pH igual 2 e agitação de 120 rpm. As amostras permaneceram sob agitação até o tempo de equilíbrio, determinado no teste cinético, as fases líquida e sólida foram separadas sem a necessidade de filtração. As concentrações das amostras foram analisadas em espectrofotômetro UV-VIS. A quantidade de corante na fase sólida foi calculada pela Equação 1.

3. Resultados e discussão

3.1 Cinética de Adsorção

A Figura 1 mostra a variação da quantidade de corante removido em função do tempo.

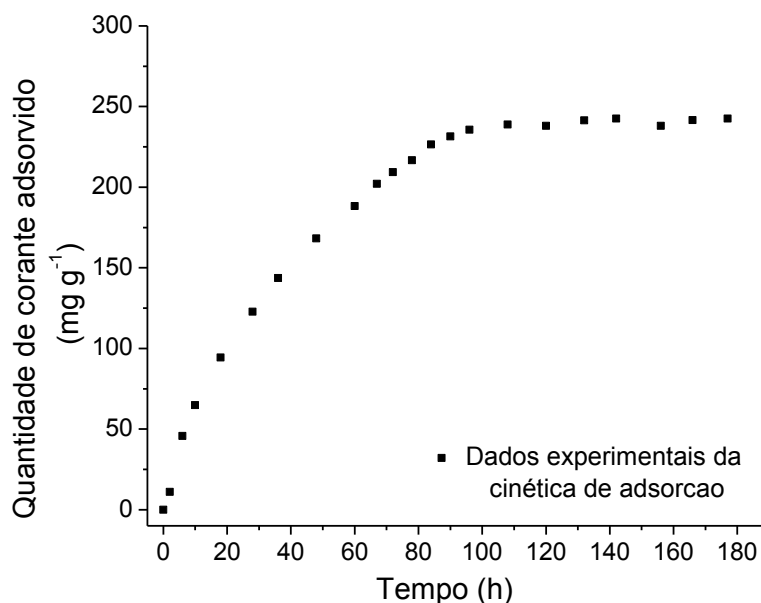


Figura 1 – Cinética de adsorção do corante Azul Reativo 5G no adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 ($m = 5$ mg, $C_0 = 150$ mg L⁻¹, pH = 2, $T = 30^\circ\text{C}$, Agitação = 120 rpm).

Como pode ser observado na Figura 1, nas primeiras 30 horas a adsorção do corante foi mais rápida. Com o passar do tempo, a adsorção fica mais lenta devido à saturação dos poros do adsorvente. De acordo com a Figura 1, o equilíbrio entre as fases líquida e sólida foi atingindo em 96 h.

3.2 Equilíbrio de Adsorção

O tempo de equilíbrio determinado a partir do teste cinético foi de 96 h (Figura 1).

As isotermas de adsorção representam uma relação de equilíbrio entre a concentração de corante na fase líquida e a quantidade de corante presente no adsorvente. Algumas isotermas fornecem uma estimativa da máxima capacidade de adsorção, além de outros parâmetros físicos. As isotermas utilizadas neste trabalho estão expostas na Tabela 2.

Com os resultados experimentais do equilíbrio construiu-se um gráfico que relaciona a quantidade de corante adsorvido no equilíbrio em função da concentração de equilíbrio na fase líquida (Figura 2). Aos resultados experimentais de equilíbrio foram ajustados os modelos de isoterma de adsorção apresentadas na Tabela 2. Os parâmetros das isotermas (Tabela 3) foram estimados com o auxílio do *software* OriginPro 8™.

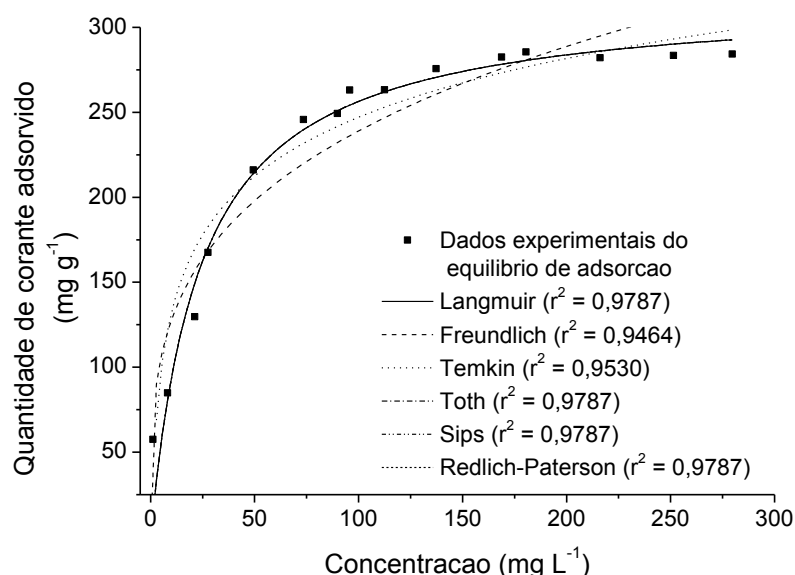


Figura 2 – Equilíbrio de adsorção do corante Azul Reativo 5G no adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 ($m = 5$ mg, $C_0 = 7 - 305$ mg L⁻¹, pH = 2, $T = 30$ °C, Agitação = 120 rpm).

Tabela 2 – Modelos de isotermas de adsorção

Isoterma	Equação	Aplicação	Característica	Referência
Langmuir	$q_e = q_{max} \left(\frac{bC_e}{1 + bC_e} \right)$	Monocamada, superfícies homogêneas	Dois parâmetros teóricos	Langmuir, 1918
Freundlich	$q_e = k_F(C_e)^{n_F}$	Multicamadas, superfícies heterogêneas	Dois parâmetros empíricos	Freundlich, 1909
Temkin	$q_e = B \ln(k_T C_e)$	Monocamada, quimissorção	Dois parâmetros teóricos	Temkin&Pyzhev, 1939
Toth	$= q_{max} \left[\frac{q_e}{b_T C_e} \right] \left(1 + (b_T C_e)^{n_T} \right)^{1/n_T}$	Multicamadas, superfícies heterogêneas	Três parâmetros empíricos	Toth, 1971
Sips	$q_e = q_{max} \left[\frac{b_S C_e^{m_S}}{1 + (b_S C_e)^{m_S}} \right]$	Langmuir e Freundlich combinadas	Três parâmetros semi-empíricos	Sips, 1950
Redlich-Paterson	$q_e = q_{max} \left[\frac{k_{RP} C_e}{1 + k_{RP} C_e^g} \right]$	Superfícies heterogêneas	Três parâmetros semi-empíricos	Redlich & Peterson, 1959

Como pode ser observado na Figura 2, em baixas concentrações, de 0 a 25 mg L⁻¹, a quantidade de corante adsorvida é praticamente linear com a concentração. Para concentrações mais elevadas, a quantidade de corante adsorvida não é proporcional com a concentração devido à saturação gradual dos poros do adsorvente.

A isoterma de Langmuir foi a que melhor representou os dados experimentais de equilíbrio com um coeficiente de correlação de 0,9787 e com capacidade máxima de adsorção igual a 315 mg g⁻¹. As isotermas de Temkin, Toth, Sips e Redlich-Paterson se sobrepuseram à isoterma de Langmuir.

Tabela 3 – Parâmetros das isotermas

Isoterma	Parâmetros
Langmuir	$q_{max} = 315 \text{ mg g}^{-1}$ $b = 0,043 \text{ L mg}^{-1}$ $r^2 = 0,9787$
Freundlich	$k_F = 68 \text{ L g}^{-1}$ $n_F = 0,003$ $r^2 = 0,9464$
Temkin	$B = 50 \text{ mg g}^{-1}$ $k_T = 1,410 \text{ L mg}^{-1}$ $r^2 = 0,953$
Toth	$q_{max} = 315 \text{ mg g}^{-1}$ $b_T = 0,043 \text{ L mg}^{-1}$ $n_T = 1$ $r^2 = 0,9787$
Sips	$q_{max} = 315 \text{ mg g}^{-1}$ $b_S = 0,043 \text{ L mg}^{-1}$ $m_S = 1$ $r^2 = 0,9787$
Redlich-Paterson	$q_{max} = 315 \text{ mg g}^{-1}$ $k_{RP} = 0,043 \text{ L mg}^{-1}$ $g = 1$ $r^2 = 0,9787$

A Tabela 4 mostra a capacidade máxima de adsorção de corantes reativos encontradas na literatura para diferentes adsorventes. Comparando os valores de capacidade máxima de adsorção apresentados na Tabela 4 com o valor obtido neste trabalho (315 mg g⁻¹), pode-se dizer que o adsorvente desta pesquisa, Dowex™ Optipore™ SD-2, apresenta capacidade máxima de adsorção muito superior, sendo mais eficiente para a remoção de corantes reativos.

Tabela 4 – Capacidade máxima de adsorção de corantes reativos encontradas na literatura

Adsorvente	q_{max} (mg g ⁻¹)	Condições operacionais	Fonte
Bagaço de laranja	25,98	T = 25°C pH = 2 v = 150 rpm	Fiorentin <i>et al.</i> , 2010
Carvão ativado	140,14	T = 30°C pH = 2 v = 100 rpm	Schimmel <i>et al.</i> , 2010
Casca de ovo	46,93	T = 22°C pH = 1 v = 700 rpm	Elkady <i>et al.</i> , 2011
Macrófita <i>Egeria Densa</i>	29,83	T = 30°C pH = 1 v = 120 rpm	Módenes <i>et al.</i> , 2011

3.3 Modelagem Matemática da Cinética de Adsorção

Para descrever a cinética de adsorção foram testados três modelos matemáticos baseados nos mecanismos de transferência de massa do processo de adsorção do corante Azul Reativo 5G no adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2, são eles: transferência de massa no filme líquido, adsorção na superfície do adsorvente e transferência de massa nos poros do adsorvente.

A Equação 2 representa a taxa de transferência de massa no filme líquido externo do adsorvente. Este modelo considera que não existe gradiente de concentração do adsorvato na fase sólida ($q_t \approx q_e$), assim, a resistência à transferência de massa na superfície do adsorvente pode ser desconsiderada.

$$\frac{dq_t}{dt} = \frac{k_f}{\rho_s} (C - C_e) \quad (2)$$

Sendo q_t a concentração do corante no adsorvente (mg g⁻¹); C a concentração do corante na fase líquida (mg L⁻¹); k_f o coeficiente de transferência de massa no filme externo (min⁻¹) e ρ_s a densidade do leito (g L⁻¹).

Para a resolução da Equação 2 é necessário conhecer a concentração de equilíbrio na fase líquida C_e , fornecida, neste trabalho, pela isoterma de Langmuir e, neste caso, $q_t = f(C_e)$. Além disso, necessita-se do balanço de massa no adsorvente, representado pela Equação 1.

Para a adsorção na superfície foi utilizado o modelo cinético de adsorção-desorção de Langmuir, apresentado na Equação 3. Este modelo considera que não existe gradiente de concentração do adsorvato nas fases sólida ($q_t \approx q_e$) e fluida ($C \approx C_e$), assim, a resistência à transferência de massa nos poros do adsorvente e no filme líquido externo podem ser desconsideradas.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{ads}C(q_{max} - q_t) - \frac{k_{ads}}{b}q_t \quad (3)$$

Sendo k_{ads} a constante cinética de adsorção de Langmuir ($L\ mg^{-1}\ min^{-1}$); b a constante de Langmuir ($L\ mg^{-1}$).

Para a taxa de transferência de massa nos poros do adsorvente, representada pela Equação 4, foi admitido que o adsorvente se comporta como um sólido homogêneo e que não existe gradiente de concentração na fase fluida ($C \approx C_e$), dessa forma, a resistência à transferência de massa no filme líquido externo pode ser desconsiderada.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_s(q_e - q_t) \quad (4)$$

Sendo k_s a constante da taxa de adsorção nos poros do adsorvente (min^{-1}).

De forma análoga a resolução da Equação 2, a concentração de equilíbrio no adsorvente (q_e) foi obtida a partir de uma isoterma de Langmuir, neste caso $q_e = f(C)$.

Para a resolução dos modelos cinéticos são necessárias duas condições iniciais, uma para a concentração de adsorvato na fase líquida e outra para a concentração de adsorvato na fase sólida, representadas pelas Equações 5 e 6, respectivamente.

$$C(0) = C_0 \quad (5)$$

$$q_t(0) = 0 \quad (6)$$

O sistema de equações diferenciais ordinárias, juntamente com as condições iniciais dos modelos cinéticos, foi resolvido pelo método de Runge-Kutta com o auxílio do *software* Maple™ 13.

Os parâmetros dos modelos cinéticos foram obtidos a partir do método de otimização Simplex não linear desenvolvido por Nelder e Mead (1965), por meio da minimização da função objetivo (F_{OBJ}) apresentada na Equação 7.

$$F_{OBJ} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{C_j^{exp} - C_j^{mod}}{C_j^{exp}} \right)^2 \quad (7)$$

Sendo n o número de dados experimentais; C_j^{exp} e C_j^{mod} as concentrações do corante em solução obtida experimentalmente e calculada pelo modelo ($mg\ L^{-1}$), respectivamente.

Para resolução dos modelos cinéticos foram utilizados os parâmetros $q_{max} = 315\ mg\ g^{-1}$ e $b = 0,043\ L\ mg^{-1}$ obtidos a partir do ajuste da isoterma de Langmuir aos dados experimentais de equilíbrio. Os valores dos parâmetros dos modelos cinéticos, das funções objetivo e dos coeficientes de correlação estão apresentados na Tabela 5.

Os valores dos coeficientes de correlação (r^2) e das funções objetivo (F_{OBJ}), apresentados na Tabela 5, mostraram que os três modelos cinéticos ajustados descrevem satisfatoriamente a adsorção do corante Azul Reativo 5G. Assim, nas condições estudadas, não foi possível

identificar o mecanismo de transferência de massa que controla o processo, neste caso, quaisquer um dos três modelos ajustados pode ser utilizado para descrever a cinética de adsorção do corante Azul Reativo 5G pelo adsorvente comercial Dowex™ Optipore™ SD-2.

Tabela 5 – Parâmetros dos modelos ajustados aos dados cinéticos

Modelo cinético	Parâmetros
Difusão no filme	$k_f = 0,4764 \text{ min}^{-1}$ $F_{OBJ} = 2,6 \cdot 10^{-3}$ $r^2 = 0,9948$
Adsorção na superfície	$k_{ads} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ L mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ $F_{OBJ} = 8,5 \cdot 10^{-4}$ $r^2 = 0,9980$
Difusão nos poros	$k_s = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ $F_{OBJ} = 8,6 \cdot 10^{-4}$ $r^2 = 0,9981$

Pela análise da Figura 3 é possível observar que os modelos cinéticos de difusão no filme externo, adsorção na superfície e difusão nos poros descreveram de forma satisfatória o processo de adsorção do corante Azul Reativo 5G.

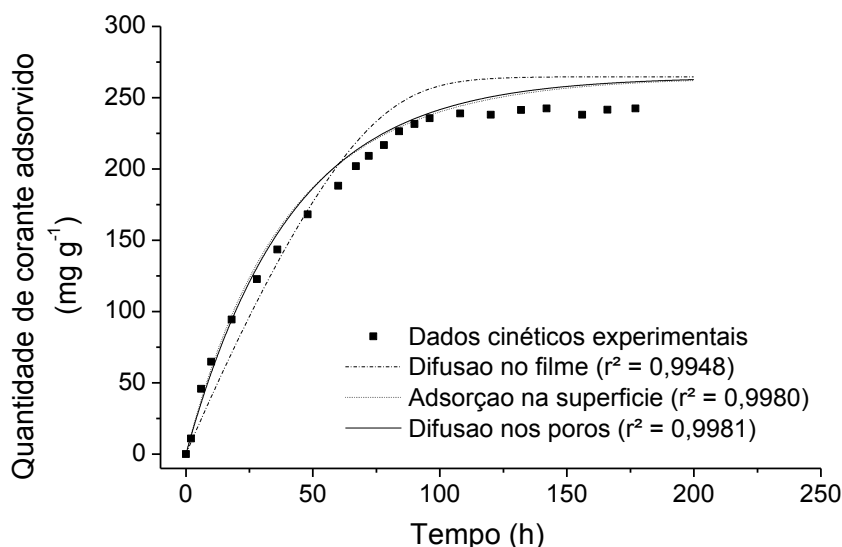


Figura 3 – Ajuste dos modelos aos dados experimentais cinéticos ($m = 5 \text{ mg}$, $C_0 = 150 \text{ mg L}^{-1}$, $\text{pH} = 2$, $T = 30^\circ\text{C}$, Agitação = 120 rpm).

4. Conclusão

Neste trabalho avaliou-se a cinética e o equilíbrio de adsorção do corante Azul Reativo 5G pelo adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2.

Os resultados cinéticos mostraram que o equilíbrio entre as fases líquida e sólida foi atingido em 96 h. A isoterma que melhor representou os dados experimentais de

equilíbrio foi a de Langmuir, com um coeficiente de correlação de 0,9787 e capacidade máxima de adsorção igual a 315 mg g⁻¹.

Os modelos cinéticos de difusão no filme, adsorção na superfície e difusão nos poros representaram de forma satisfatória a adsorção do corante Azul Reativo 5G. Não foi possível determinar a etapa limitante do processo de adsorção estudado.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que o adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 foi eficiente na remoção do corante Azul Reativo 5G, apresentando elevada capacidade de adsorção (315 mg g⁻¹) quando comparado a outros tipos de adsorventes. Desta forma, sugere-se que tal adsorvente pode ser utilizado com elevada eficiência na remoção do corante Azul Reativo 5G de efluentes têxteis.

5. Bibliografia

- Barakat, M. A. 2011. Adsorption and photodegradation of Procion yellow H-EXL dye in textile wastewater over TiO₂ suspension. *Hydro-environment Research*. Vol. 5, p. 138.
- Elkady, M. F.; Ilbrahim, A. M.; El-Latif, M. M. A. 2011. Assessment of the adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamic for the potential removal of reactive red dye using eggshell biocomposite beads. *Desalination*. Vol. 278, p. 412-423.
- Fiorentin, L. D. F.; Trigueros, D. E. G.; Módenes, A. N.; Espinoza-Quiñones, F. R.; Pereira, N. C.; Barros, S. T. D.; Santos, O. A. A. 2010. Biosorption of reactive blue 5G dye onto drying orange bagasse in batch system: Kinetic and equilibrium modeling. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 163, p. 68-77.
- Freundlich, H. 1909. The theory of adsorption. *Zeitschrift fuer Chemie und Industrie der Kolloide*. Vol. 3, p. 212-220.
- Hameed, B. H. 2008. Equilibrium and kinetic studies of methyl violet sorption by agricultural waste. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 154, p. 204-212.
- Kimura, I. Y.; Gonçalves JR, A. C.; Stolberg, J.; Laranjeira, M. C. M.; Fávere, V. T. de. 1999. Efeito do pH e do tempo de contatonaadsorção de corantes Reativos por microesferas de quitosana. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, p. 51-57.
- Koprivanac, N.; Kusic, H.; Vujevic, D.; Peternel, I.; Locke, B. R. 2005. Influence of iron on degradation of organic dyes in corona. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 117, p. 113-119.
- Kyzas, G. Z.; Lazaridis, N. K.; Mitropoulos, A. C. 2012. Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 189-190, p. 148-159.
- Langmuir, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, v. 40, p. 1361-1402.
- Manenti, D. R.; Gomes, L. F. S.; Borba, F.H.; Módenes, A. N.; Espinoza-Quiñones, F.R.; Palácio, S. M. 2010. Otimização do processo foto-Fenton utilizando irradiação artificial na degradação do efluente têxtil sintético. *Engevista (UFF)*. Vol. 12, n1, p. 22-32.
- Módenes, A. N.; Espinoza-Quiñones, F. R.; Alflen, V. L.; Colombo, A.; Borba, C. E. 2011. Utilização da macrófita *Egeria Densa* na biosorção do corante reativo 5G. *Engevista (UFF)*. Vol. 13, No. 03, p. 160-166.

- Nelder J. A.; Mead R. 1965. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*. Vol. 7, p. 308-315.
- Pajootan, E.; Arami, M.; Mahmoodi, N. M. 2012. Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Vol. 43, p. 282-290.
- Palácio, S. M.; Espinoza-Quiñones, F. R.; Módenes, A. N.; Oliveira, C. C.; Borba, F.H.; Silva Jr., F.G. 2009. Toxicity assessment from electro-coagulation treated-textile dye wastewaters by bioassays. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 172, p. 330-337.
- Redlich, O.; Peterson, D.L. 1959. A useful adsorption isotherm, *J. Phys. Chem.* v. 63, p. 1024–1026.
- Schimmel, D.; Fagnani, K. C.; Santos, J. B. O. dos; Barros, M. A. S. D. Silva, E. A. da. 2010. Adsorption of turquoise blue QG reactive dye on commercial activated carbon in batch reactor: kinetic and equilibrium studies. *Journal of Chemical Engineering*. Vol. 27, No. 02, p. 289 - 298.
- Sips, R., J. 1950. *Chem. Phys.* v. 18, 1024.
- Temkin, M. I; Pyzhev, V. 1939. Kinetics of the synthesis of ammonia on promoted iron catalysts. *Zhur. Fiz. Khim*, v. 13, p. 851-867.
- Texpal Indústria Química. 2005. *Boletim técnico do corante Azul Reativo BF 5G*. Valinhos, SP.
- Toth, J. 1971. State Equations of the Solid-gas Interface Layers. *Acta Chem. Acad. Hung*, v. 69, p. 311-328.
- Vimonses, V.; Lei, S.; Jin, B.; Chow, C. W. K.; Saint, C. 2009. Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 148, p. 354-364.
- Zahrim, A. Y.; Tizaoui, C.; Hilal, N. 2011. Coagulation with polymers for nanofiltration pre-treatment of highly concentrated dyes: A review. *Desalination*. Vol. 266, p. 1-16.